

MÉTODO DE CÁLCULO DEL RUIDO TRANSMITIDO A LO LARGO DE CIRCUITOS DE AIRE

PACS: 43.55.Rg

Parrondo Gayo, Jorge¹; Fernández Francos, Joaquín¹; Rodríguez Álvarez, David¹; Alonso Vega, Emilio²

¹ Universidad de Oviedo, E.T.S. Ingeniería de Gijón, Campus de Viesques.

33204 GIJÓN

Tel: 985 182 097. Fax: 985 182 098. E-mail: parrondo@correo.uniovi.es

² Ingeniería de Producción S.L.

Avda. Pablo Iglesias, 81

33204 GIJÓN

ABSTRACT

The theoretical calculation of the noise transmitted along air circuits towards the ventilated rooms, which is necessary for the selection of silencers at the system design stage, is not only complex but also unreliable if the internal noise reflections are not considered. To overcome these difficulties an iterative calculation procedure has been developed, in which each circuit element is simulated as an n-port system, with n equal to the number of air inputs/outputs. Its acoustic state is then defined by the parameters of a source vector and an incident sound dispersion matrix, which are dependent on the frequency and other variables. Sound internal reflections are taken in account by means of the progressive generation of new virtual sound sources. The procedure was implemented in a general purpose calculation program, also adequate for the selection of silencers to achieve any acoustic requirement. Some description of the calculation algorithm and the program characteristics is presented below.

RESUMEN

El cálculo teórico del ruido transmitido a lo largo de los circuitos de aire hacia los locales ventilados, necesario para un adecuado dimensionamiento de los silenciadores ya en la etapa de diseño de la instalación, resulta complejo y además poco fiable si no se contemplan las reflexiones sonoras internas. Para paliar esas dificultades se ha llevado a cabo un procedimiento iterativo de cálculo, en el que cada elemento de un circuito es asimilado a un sistema de tantos puertos como bocas de entrada/salida de aire, cuyo estado acústico queda definido por los parámetros de un vector fuente y una matriz de dispersiones del sonido incidente sobre cada puerto, que son función de la frecuencia además de otras variables. Las reflexiones internas del sonido son tenidas en cuenta mediante la generación progresiva de nuevos focos virtuales. El procedimiento se incorporó en un programa de cálculo de propósito general, también adecuado para la selección de silenciadores, del que se muestran algunas características.

INTRODUCCIÓN

Los circuitos de ventilación y aire acondicionado pueden actuar como canalizadores de ruido hacia los locales ventilados. Por ello en muchos casos resulta necesario realizar un adecuado acondicionamiento acústico de la instalación, mediante la inserción de silenciadores disipativos o

reactivos. Este acondicionamiento ha de ser tal que se cumplan unas determinadas especificaciones de calidad sonora, definidas bien mediante un nivel máximo admisible de ruido total (en dBA), como prescribe el RITE [1], o bien mediante unas ciertas distribuciones espectrales asociadas por ejemplo a los índices NR o RC [2]. Resulta muy conveniente la predicción de los niveles de ruido transmitidos ya en la fase de diseño de la instalación, para poder así efectuar una selección óptima de los silenciadores y evitar tener que efectuar reacondicionamientos una vez concluida la obra, que pueden resultar muy costosos. Sin embargo ese cálculo no es sencillo.

Normalmente las fuentes primarias de ruido son los propios ventiladores, y su correcta estimación ya puede suponer una primera dificultad, dada la gran variabilidad entre tipos de ventiladores e incluso, para un ventilador dado, dada la dependencia del ruido generado respecto a su punto de funcionamiento (caudal circulante). Pero por otra parte a lo largo de las conducciones del circuito de aire ese ruido sufre diversas modificaciones, debido a mecanismos de atenuación tanto pasiva (absorción) como reactiva (reflexión, resonancia), y también a mecanismos de regeneración aerodinámica (turbulencia). Tanto la atenuación como la generación de ruido de cada elemento (codos, contracciones, ramificaciones, terminales,...) son función de la frecuencia, de la velocidad local del aire circulante y por supuesto de las características geométricas. Para la predicción de los niveles de ruido transmitidos se suelen utilizar correlaciones empíricas, tales como las indicadas por ASHRAE [3], que permiten estimar los aumentos y disminuciones de ruido habidos en cada elemento en función de la frecuencia (para cada banda de octava). No obstante, el método habitual de cálculo se basa en una acumulación lineal, siguiendo la dirección del flujo de aire, de dichos aumentos y reducciones de ruido, sin contemplar las reflexiones internas en el sistema, por lo que en muchos casos las predicciones resultan ser no conservadoras, y con errores de hasta 10 dBA [4].

Con el objetivo de facilitar la determinación del ruido transmitido a lo largo de los circuitos de aire y a la vez mejorar la fiabilidad de las predicciones, se ha desarrollado un método de cálculo, en el que cada elemento del circuito (los conductos rectos, los codos, etc.) se han asimilado a sistemas acústicos de dos puertos (tres o más para las ramificaciones), con dos variables de estado para cada puerto: los frentes de onda sonoros entrantes y salientes respectivamente. Las propiedades de transmisión acústica de cada elemento quedan definidas por un conjunto de parámetros (atenuaciones o admitancias), dependientes de la frecuencia, que relacionan la potencia sonora incidente sobre cada puerto con la reflejada y la transmitida en cada uno de los demás. Estas admitancias se pueden determinar de forma experimental o también se puede aproximar su valor mediante correlaciones empíricas tales como las indicadas por ASHRAE. El método de cálculo se basa en efectuar una acumulación de reducciones (también aumentos) de ruido a través de cada elemento, siguiendo en un principio la dirección del flujo de aire, pero también el sentido contrario cada vez que el sonido alcance un elemento que origine reflexión, como es el caso de los codos o las terminales. Estas sucesivas reflexiones internas son contempladas mediante la generación de nuevas fuentes de ruido *virtuales*. A continuación se ofrece una breve descripción de la base del método de cálculo así como del programa informático para PC derivado para su aplicación en instalaciones reales.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Considérese a cada elemento de un determinado circuito de aire como un sistema acústico lineal, invariante en el tiempo, y con tantos puertos n de entrada/salida como bocas tenga dicho elemento (en general $n=2$, y para las ramificaciones $n=3$). Normalmente la mayor parte de la energía sonora transmitida está asociada a frecuencias bajas o medias, con lo que el primer modo acústico (ondas planas) es el dominante (aproximadamente válido para $\lambda > 2D$). Si se admite que la transmisión de sonido a lo largo del circuito sucede básicamente en el modo de ondas planas, el estado acústico de cada elemento se puede describir completamente utilizando $2n$ variables de estado, que pueden ser por ejemplo las presiones de las ondas incidentes (p_+) y reflejadas (p_-) en cada puerto [5,6]. Adoptando estas variables de estado, la ecuación que caracteriza un elemento acústico de 2 puertos (figura 1) se puede expresar así:

$$\begin{bmatrix} p_{a+} \\ p_{b+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_a & \tau_b \\ \tau_a & \rho_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{a-} \\ p_{b-} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_a^s \\ p_b^s \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} p_{a-} \\ p_{b-} \end{bmatrix} + \mathbf{V} \quad (1)$$

donde \mathbf{V} (vector fuente) representa la generación interna de ruido desde el elemento de estudio hacia cada dirección a y b , y \mathbf{M} (matriz de dispersión o de admitancia) recoge las propiedades pasivas de transmisión y reflexión de las ondas incidentes sobre el elemento: \tilde{n}_a y \tilde{n}_b representan la proporción de sonido procedente desde cada dirección a y b que se refleja, mientras que τ_a y τ_b representan la proporción de sonido que atraviesa el elemento.

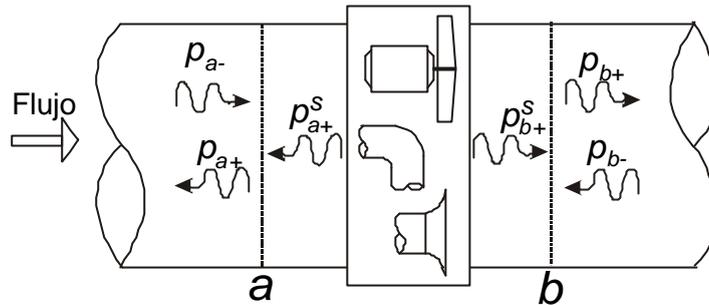


Figura 1. Elemento de un circuito de aire (ventilador, codo, terminal, etc.) simulado como un sistema acústico de 2 puertos, a y b , con los distintos frentes de onda entrantes y salientes.

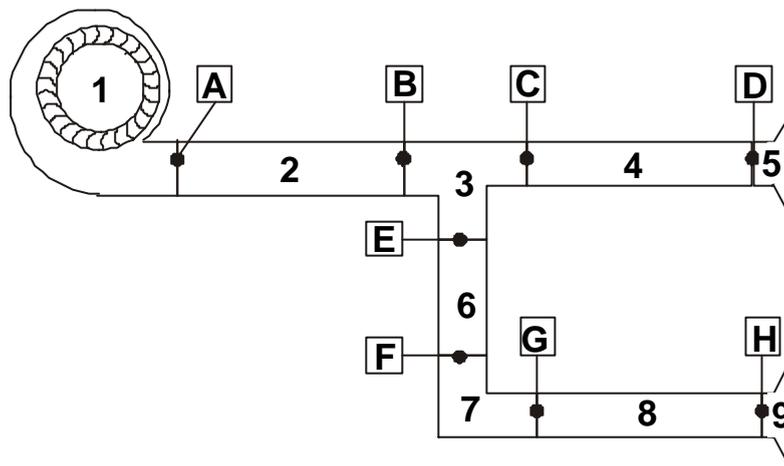


Figura 2. Esquema de un circuito de aire simple, con 9 elementos y 8 puertos interiores (A-H).

Por tanto, con este modelo, la generación y transmisión del ruido a través de cada elemento viene caracterizada por un total de 6 parámetros (serían 12 para una ramificación de 3 bocas), que son complejos (módulo=amplitud y argumento=desfase) y que son dependientes de la frecuencia además de las condiciones aerodinámicas (caudal de aire circulante). Para la obtención experimental de estos 6 parámetros complejos se han propuesto distintas técnicas, de distinto grado de laboriosidad en función del nivel de precisión deseado; normalmente están basadas en la medida de señales de presión sonora a ambos lados del elemento de estudio, preferentemente bajo la imposición de distintos estados acústicos controlados externamente con altavoces (véanse por ejemplo las referencias [5-7] sobre la caracterización de codos y ventiladores). Si el elemento en cuestión es un ventilador (principal generador de ruido), será de especial interés el vector fuente \mathbf{V} , mientras que para la mayoría de los demás elementos tendrá más relevancia la matriz de dispersión \mathbf{M} . Para elementos simétricos, como codos sin cambio de sección, puede ser razonable admitir $\tilde{n}_a = \tilde{n}_b$ y $\tau_a = \tau_b$ si el número de Mach es suficientemente pequeño (lo más habitual). En el caso de elementos que sean tramos rectos de conducto, no hay reflexión y $\tilde{n}_a = \tilde{n}_b = 0$.

Una vez conocidos el vector fuente y la matriz de admitancias de cada elemento, ya es posible estudiar la transmisión de ruido hacia cualquiera de las terminales del circuito, teniendo en cuenta las reflexiones internas. Una forma ventajosa de efectuar dicho cálculo es avanzar de

forma iterativa siguiendo los frentes de onda a lo largo de cada conducto, partiendo sucesivamente desde cada uno de los elementos generadores de ruido (con vector fuente no nulo). El puerto de salida (por ejemplo b) de un elemento dado (por ejemplo #1) coincide con el puerto de entrada (a) al elemento siguiente (#2), es decir: $p_{1b+} = p_{2a-}$, valor que habrá de sumarse a una variable de presión sonora acumulada para cada puerto (y frecuencia). El nuevo frente de onda saliente del segundo elemento se puede obtener como:

$$\begin{bmatrix} p_{a+} \\ p_{b+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \tau_b \\ \tau_a & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{a-} \\ p_{b-} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Siempre que un elemento de la diagonal principal de la matriz de admitancias no sea nulo se dará lugar a reflexión, la cual se puede simular suponiendo un nuevo foco *virtual* emisor de ruido desde el puerto de incidencia, de modo que el vector fuente de este foco virtual sería:

$$\begin{bmatrix} p_a^s \\ p_b^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_a & 0 \\ 0 & \rho_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{a-} \\ p_{b-} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Nivel de reflexión	Puerto origen	Puertos con nuevos focos virtuales							
		A	B	C	D	E	F	G	H
0	-	+							
1	A		-		-		-		-
2	B	+							
2	D	+		+			-		-
2	F	+			-	+			
2	H	+			-	+		+	

Como ejemplo, la tabla 1 muestra en qué puertos se irían generando focos virtuales (hasta el segundo nivel de reflexión) para el caso del circuito de aire de la figura 2, que cuenta con 9 elementos y 8 puertos de interconexión (A-H), a partir del ruido emitido inicialmente desde el ventilador (puerto A). Los signos +/- indican si la emisión de sonido es a favor o en contra del sentido de la corriente de aire. Se observa que, a pesar de la sencillez del circuito, se generan 4 focos virtuales de nivel 1 y, a partir de éstos, hasta 12 focos de nivel 2.

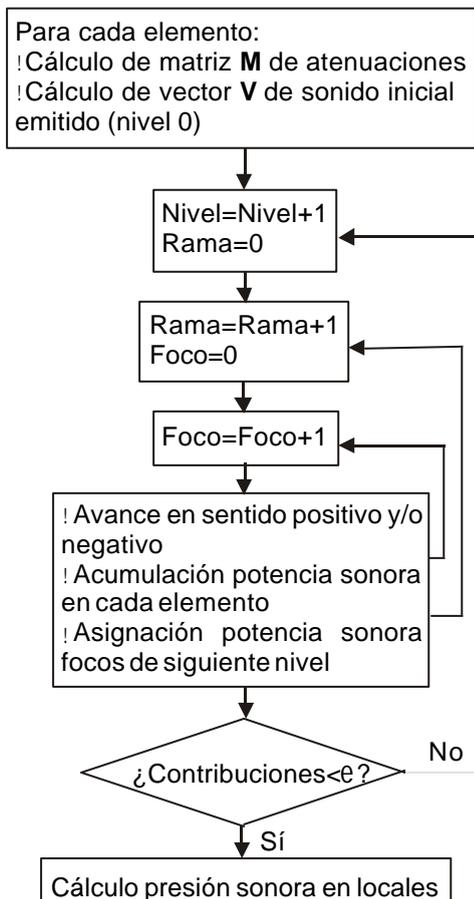


Figura 3. Diagrama de flujo simplificado del

PROGRAMA DE CÁLCULO

En la práctica resulta bastante difícil disponer de los distintos coeficientes (complejos y muy dependientes de la frecuencia) que forman la matriz M y el vector V de cada elemento de un posible circuito (ecuación 1). Una alternativa simplificadora es establecer las relaciones de las ecuaciones (1-3) no entre frentes de onda, sino entre flujos de energía sonora, con lo que dichos coeficientes ya no son complejos sino reales y, además, la dependencia respecto a la frecuencia se puede agrupar por bandas, bien de octavas o de tercios de octava (no se pueden considerar efectos de resonancia). Con esta simplificación,

los coeficientes de generación, transmisión y reflexión de ruido de cada tipo de elemento se pueden obtener a partir de correlaciones empíricas tales como las propuestas por ASHRAE [3]. Éste ha sido el método seguido para la realización práctica de un programa especial de cálculo para PC, adecuado para circuitos constituidos por los tipos de elementos habituales, incluidos silenciadores. Su algoritmo de cálculo, que sigue las pautas indicadas en el apartado anterior, se resume en el diagrama de flujo de la figura 3. El proceso de generación de focos virtuales de niveles de reflexión progresivamente mayores concluirá cuando la amplitud de los correspondientes frentes de onda (que irá disminuyendo por las sucesivas atenuaciones de cada elemento) sea suficientemente pequeña. Como ejemplo, la siguiente tabla muestra la evolución del nivel de presión sonora calculado sobre varios niveles de reflexión, para el caso de la terminal #5 del circuito de la figura 2, en el que un ventilador (centrífugo) hace circular 1000 m³/h de aire y todos los conductos tienen 200x200 mm² de sección y 2 m de largo:

Tabla 2. Predicciones del Lp para el circuito de la fig. 2 (terminal #5).

Nivel de reflexión	Nivel de presión sonora (dB) por bandas de octava								
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Total (dBA)
0	52.6	49.0	49.4	47.5	45.6	40.8	36.9	33.3	50.1
1	53.0	49.6	50.4	48.7	46.9	41.6	37.7	34.1	51.2
3	53.0	49.6	50.6	49.2	47.4	41.8	37.8	34.3	51.6
6	53.0	49.6	50.7	49.3	47.6	41.9	37.8	34.3	51.7

Las principales características del programa desarrollado son:

- Se apoya en el programa denominado *Condu-2D*, de IDPSoft, para una eficiente introducción de datos y configuración del circuito de aire bajo estudio.
- Opción 1: cálculo del ruido inducido en locales a través de cualquier terminal.
- Opción 2: cálculo del silenciador (reactivo o disipativo) necesario para alcanzar una determinada especificación de ruido en las terminales, la cual se puede referir a un nivel total en dBA (exigido por el RITE [1]), o bien a un determinado índice RC o NR (recomendado por RITE [2] y ASHRAE [3]).

La figura 4 muestra el aspecto de la ventana de diálogo para la definición del cálculo de un silenciador reactivo, mientras que la figura 5 es un ejemplo de cálculo de la distribución espectral del nivel de presión sonora en un local (obtenido tras calcular e insertar un silenciador reactivo para alcanzar un nivel máximo de 45 dBA).

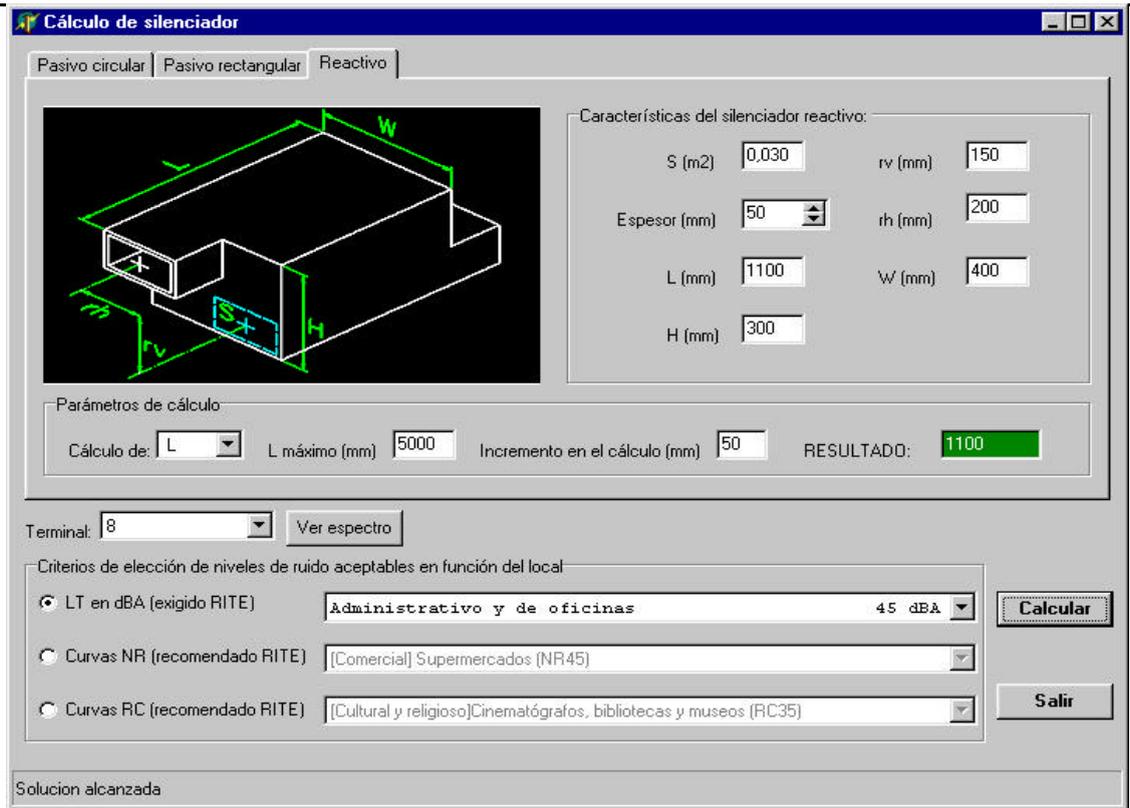


Figura 4. Muestra del cuadro de diálogo para el cálculo de silenciadores.

CONCLUSIONES

Se ha llevado a la práctica un método iterativo para el cálculo del ruido transmitido a lo largo de circuitos de aire hacia los locales ventilados, basado en el conocimiento previo de las propiedades de generación, transmisión y reflexión acústicas de cada elemento que compone el circuito, en función de la frecuencia y del caudal circulante. Para contemplar las sucesivas reflexiones internas del sonido desde elementos tales como codos o terminales se recurrió a la generación de focos sonoros virtuales. A partir de las correlaciones de caracterización de distintos tipos de elementos recomendadas por ASHRAE se elaboró un programa adecuado para el cálculo de la transmisión de ruido en circuitos de aire genéricos, que además permite dimensionar a priori los silenciadores (bien reactivos o bien disipativos) a insertar en un determinado tramo del circuito para alcanzar las especificaciones de ruido deseadas en los locales ventilados.

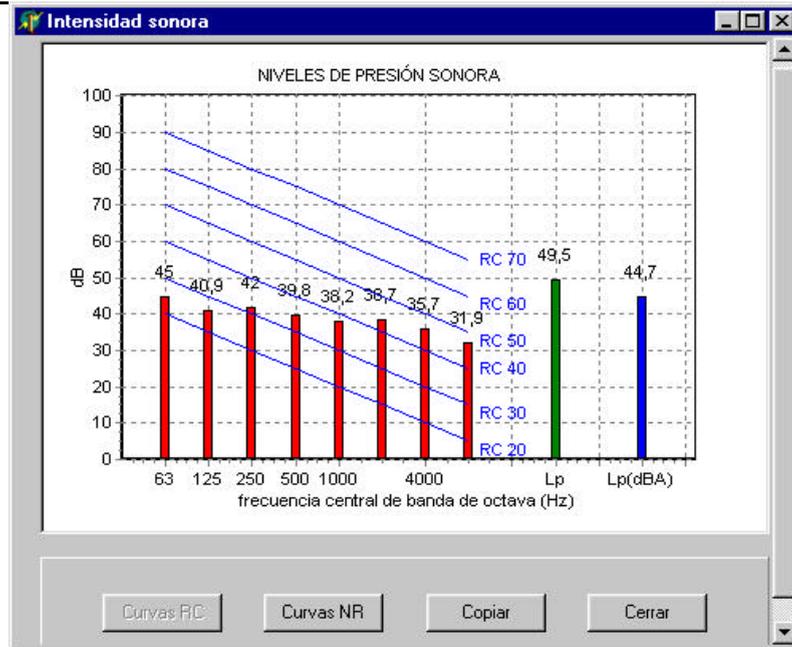


Figura 5. Espectro de presión sonora calculado para el local de una terminal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del Proyecto DPI-00-0686 titulado "Diseño acústico de circuitos de aire basado en las propiedades de generación y transmisión acústica de cada elemento".

REFERENCIAS

- [1] Real Decreto 1751/1998: Reglamento de Instalaciones Técnicas en los Edificios (RITE), ITE 02: Diseño.
- [2] "Comentarios al Reglamento de Instalaciones Técnicas en los Edificios". IDAE, Madrid, 1998.
- [3] ASHRAE Handbook-Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications, cap. 46: "Sound and vibration control", ASHRAE Inc., USA, 1999.
- [4] M. Terao, H. Sekine (1992): "Fan acoustical characteristics required for reliable HVAC duct sound prediction", Proc. of int. symp. on Fan Noise (Senlis, Francia), 343-350.
- [5] J. Lavrentjev, M. Abom, H. Bodén (1995): "A measurement method for determining the source data of acoustic two-port sources", Journal of Sound and Vibration **183**(3), 517-531.
- [6] J.L. Parrondo, P. García, C. Santolaria, J. González (1999): "Caracterización experimental de las funciones de fuente y admitancia acústica de elementos de sistemas de ventilación". TecniAcústica-1999, Ávila.
- [7] H. Bodén, R. Glav, R. Ter-Riet (1999): "Measurement of sound transmission through a 90° bend with flow", Proc. 6th int. cong. on Sound and Vibration (Lyngby, Dinamarca), V1, 369-374.